第 37 卷第 2 期 生 态 学 报 Vol.37,No.2
2017 年 1 月 ACTA ECOLOGICA SINICA Jan.,2017

DOI: 10.5846/stxb201508101688
王玉红,马天娥,魏艳春,魏孝荣,邵明安,程积民,张兴昌.黄土高原半干旱草地封育后土壤碳氮矿化特征.生态学报,2017,37(2):378-386.
Wang Y H, Ma T E, Wei Y C, Wei X R, Shao M A, Cheng J M, Zhang X C. Influence of grazing exclusion on soil organic carbon and nitrogen mineralization in semiarid grasslands of the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(2): 378-386.

黄土高原半干旱草地封育后土壤碳氮矿化特征

王玉红[1,2],马天娥[3,4],魏艳春[3,4],魏孝荣[1,3,*],邵明安[1,3],程积民[1,3],张兴昌[1,3]

1 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 杨凌 712100
2 中国科学院大学, 北京 100049
3 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100
4 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100

摘要:土壤有机碳和全氮的分布与矿化是退化草地封育后土壤生态效应研究的重要内容和指标。结合野外调查和室内培养实验,研究了半干旱黄土区不同封育年限草地土壤有机碳和全氮的含量变化及其矿化特征。结果表明,封育对半干旱黄土区退化草地土壤有机碳和全氮的影响主要体现在 0—40 cm 土层,封育超过 17a 后,封育年限的影响逐渐减弱。封育显著增加了土壤有机碳矿化速率和 C_{min}/C_0,封育对有机碳矿化速率的影响与封育年限和土层深度无关,而对 C_{min}/C_0 的影响则与封育年限和土层深度有关。封育显著提高了 0—40 cm 土层土壤氮素矿化速率,但是降低了 40—80 cm 土层土壤氮矿化速率,并且降低了 0—80 cm 土层 N_{min}/N_0。碳氮矿化速率与有机碳和全氮之间显著相关,而与碳氮比之间的相关性较小。这些结果表明,退化草地封育后土壤碳氮元素的转化主要受土层深度、封育年限以及土壤碳氮含量的影响。

关键词:退化草地封育;土壤有机碳;土壤全氮;剖面分布;矿化;土壤特性

Influence of grazing exclusion on soil organic carbon and nitrogen mineralization in semiarid grasslands of the Loess Plateau

WANG Yuhong[1,2], MA Tian'e[3,4], WEI Yanchun[3,4], WEI Xiaorong[1,3,*], SHAO Ming'an[1,3], CHENG Jimin[1,3], ZHANG Xingchang[1,3]

1 *Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling* 712100, *China*
2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*
3 *State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling* 712100, *China*
4 *College of Natural Resources and Environment, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling* 712100, *China*

Abstract: Grazing exclusion is an important method for rehabilitating degraded ecosystems in grassland-dominated parts of the semiarid region. However, how ecosystem processes respond to this rehabilitation has not been assessed well. For understanding how the carbon and nitrogen cycling in degraded grasslands responds to such grazing exclusions, it is essential to study the distribution and mineralization of soil organic carbon and nitrogen. Field measurements and laboratory incubations of soil (at 0—80 cm depth) from the Loess Plateau's semiarid region were combined to analyze the soil organic carbon and nitrogen distribution and mineralization after various years of grazing exclusion. Samples were collected from grasslands where grazing was excluded for 17, 22, and 27 years, respectively. As a control, additional soil samples were collected from continuously grazed grasslands that neighbored the grazing exclusion ones. Organic carbon and nitrogen

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41271315, 41571296);教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-13-0487);中国科学院青年创新促进会科研专项资助项目(2014371)

收稿日期:2015-08-10; **网络出版日期**:2016-06-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xrwei78@163.com

contents, as well as organic carbon and nitrogen mineralization rates, were measured. The effects of grazing exclusion on the distribution of organic carbon and nitrogen mainly occurred in the top 0—40 cm of the soil. Grazing exclusion significantly increased soil organic carbon and nitrogen content, with the largest increases being observed after 17 years of exclusion. However, beyond 17 years, the effects on organic carbon and nitrogen distribution became weaker with time. Furthermore, although for all treatments organic carbon mineralization rates decreased with soil depth, for grazing excluded grasslands the organic carbon mineralization ratio (C_{min}/C_0) increased more with soil depth. The grazing exclusion effects on mineralization rate were independent of exclusion years or soil layers, in contrast to the effects on C_{min}/C_0, which did correlate with both these factors. In addition, nitrification and mineralization rates of nitrogen decreased with soil depth, whereas in contrast, the ammonification rate increased. At 0—40 cm soil depth, nitrification rates ranged between 1.5 and 2.5μg g^{-1} d^{-1}, and ammonification rates between −1.6 and 0.1 μg g^{-1} d^{-1}. This indicates a nitrification dominated nitrogen mineralization in this soil layer. At 40—80 cm depth, nitrification and ammonification rates ranged between 1.3 and 1.8μg g^{-1} d^{-1}, and between 0.7 and 0.8μg g^{-1} d^{-1}, respectively, suggesting that nitrification and ammonification contributed similarly to nitrogen mineralization in deeper soils. Furthermore, grazing exclusion significantly increased the mineralization rate of nitrogen in the 0—40 cm layer, while it decreased this in the 40—80 cm layer. The overall nitrogen mineralization ratio (N_{min}/N_0) also decreased when grazing was excluded. Finally, the mineralization of organic carbon and nitrogen were significantly correlated with the soil organic carbon and nitrogen content, but less so with the soil carbon to nitrogen ratio (C/N). Overall, the results of this study indicate that the turnover of organic carbon and nitrogen in grazing excluded grassland was determined mainly by soil layer, grazing exclusion duration, and soil organic carbon and nitrogen content.

Key Words: grazing management; soil organic carbon; nitrogen; soil profiles; carbon mineralization; soil properties

我国草地总面积约 4 亿 hm^2,占国土面积的 41.7%[1];其中黄土高原草地面积就达 6000 万 hm^2,天然草地占 85%,人工和改良草地占 15%,占该区域土地总面积的 32.6%[2]。受长期过度放牧和人类生产活动的影响,该区草地退化严重,载畜量大幅度下降,水土保持功能减弱[3]。草地资源保护和提升的各种措施,如退耕还草,草牧轮作,和封育禁牧等,在该区得到大范围推广,并取得了一定的成效。其中,退化草地封禁恢复是国内外保护和恢复天然草地植被的有效方法[2]。退化草地封育后能够显著提高牧草地上和地下生物量[4-5],增加土壤种子库的丰富度和多样性,从而增加物种多样性[6-7],并使草地植被群落结构发生了较大变化,群落的演替过程趋于正常阶段,建群种和伴生种的分布也越来越明显[2]。

土壤有机碳和全氮含量及其动态平衡过程是反映土壤质量和草地健康状况的重要指标,直接影响到草地土壤肥力和草地生产力[8]。土壤有机碳氮矿化是土壤生物通过自身活动、分解和利用土壤中有机碳氮来完成自身代谢,同时释放出 CO_2或无机碳氮的过程,直接关系到土壤中养分的释放与供应及土壤质量的维持等,是影响植物生长和植被生产力的关键因素[9]。目前研究者对不同土地利用方式、不同土壤管理措施下土壤有机碳氮的矿化特征进行了大量的研究,为认识土壤碳氮动力学过程奠定了基础[10-12]。宁夏云雾山是黄土高原封育时间最长的草地群落,关于该区不同封育年限下土壤有机碳氮分布、碳库组成、土壤生物学性质演变等方面已经开展了一些研究[13-16],而对土壤碳氮矿化影响方面的研究亟待展开。本研究正是针对宁夏云雾山草原自然保护区于 1982 年开始封育以来不同封育年限草地,分析了土壤有机碳氮的剖面分布和矿化特征,并分析了土壤有机碳氮矿化与土壤有机碳氮含量的关系,以期为正确认识土壤碳氮动力学特征对退化草地封育的响应特征,并为揭示草地封育后土壤碳氮演变特征及机理提供依据。

1　材料与方法

1.1　研究区域概况

本研究在宁夏云雾山草原自然保护区进行,研究区位于宁夏固原市东北部,属于黄土高原中部的黄土丘

陵干旱区(36°13′—36°19′N;106°24′—106°28′E),海拔 1800—2148 m,面积 6700 hm^2。保护区属中温带半干旱气候区,年均气温 6.9 °C,月均温以 7 月最高(24 °C),1 月最低(-14 ℃)。年均降水量为 425 mm,无霜期 124 d(4 月中旬至 9 月末)。土壤为黄土母质上发育的灰褐土,主要的草被植物有本氏针茅(*Stipa bungeana*)、百里香(*Thymus mongolicus*)、铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)、星毛萎陵菜(*Potentilla acaulia*)、大针茅(*Stipa grandis*)等,其中丛生禾本科植物本氏针茅在该区分布范围最广。

1.2 土壤样品采集与测定

1.2.1 样品采集

云雾山自然保护区分别于 1982、1987、1992、2002 年对未封育草地进行封育,形成了不同的封育年限梯度。封育前该区土壤的土壤类型、植被组成相似,自然条件相同,土壤理化性质相似[17]。2009 年在云雾山自然保护区选取不同封育年限草地和与封育草地相邻的放牧草地(对照样地)作为研究样地。所有样地均不施肥,优势植物为本氏针茅和铁杆蒿。为了减小地形差异,采样地块尽量选在相似的海拔高度,各样地优势植被均为本氏针茅和铁杆蒿。本研究所选的放牧草地载畜量因年份不同有所差异,但前期的研究表明相邻连续放牧区的土壤有机碳和氮从 1982 年至 2009 年的 27 年间没有显著变化[18],因此本研究所选的不同封育年限草地土壤初始养分条件相似,而且所选的与封育草地相邻的连续放牧样地可作为对照,以用来分析不同封育年限草地土壤碳氮含量和矿化特征的变化。

于 2009 年 8 月在所选取的封育草地样地和连续放牧样地各布设 5 个采样小区(30 m×30 m),采样小区至少间隔 2 km,因此可以作为各个年限封育草地或者放牧草地的重复。在每个小区内随机选取 3 个点用土钻(直径 9 cm)采集 0—5、5—10、10—20、20—40、40—60 cm 和 60—80 cm 土层土壤样品,3 个土壤剖面样品分层混合组成混合样品,拣出土样中植物根系和植物残体后,风干备用。

1.2.2 样品测定

取一部分风干土壤样品研磨过 0.25 mm 筛,用于测定土壤有机碳和全氮含量。土壤有机质和全氮含量用 VARIO EL Ⅲ CHO 分析仪(Elementar,德国)测定。土壤有机碳矿化采用室内恒温培养-碱液吸收法测定,具体方法为称取 10.0 g 土壤样品置于 250 ml 玻璃组织培养瓶底部,内置盛有 5 ml 0.5 mol/L NaOH 溶液的小玻璃瓶,土壤湿度用蒸馏水调至其田间持水量的 60%,在 25 °C 条件下培养 7 d。分别于培养的第 1、3、5、7 天用 0.5 mol/L 的 HCl 滴定测定 NaOH 溶液吸收的 CO_2 量,计算培养过程中 CO_2 的释放量,根据 CO_2 的释放量计算出培养期内土壤有机碳的矿化量。同时用 KCl 浸提-流动分析仪分别测定培养前后的土壤硝态氮(NO_3^-)和铵态氮(NH_4^+)含量,计算土壤氮素矿化量。

1.3 数据计算与分析

采用 SPSS 16.0 软件进行数据统计分析,采用双因素方差分析和 Tukey 分析不同封育年限和土层深度各变量的差异显著性,用相关分析方法分析矿化特征与土壤有机碳和全氮含量之间的关系。所有图件利用 SigmaPlot 10.0 软件绘制。

2 结果与分析

2.1 土壤碳氮剖面分布

研究区草地土壤有机碳和全氮含量均随土层深度增加逐渐降低(图 1),所有处理的土壤有机碳平均值从 30.6 g/kg(0—5 cm)降到 16.2 g/kg(60—80 cm)(降幅 88.7%);全氮从 3.1 g/kg(0—5 cm)降到 1.7 g/kg(60—80 cm)((降幅 80.8%);所有处理 C/N 在土壤各剖面均介于 8—10 之间。封育显著影响了土壤有机碳、全氮含量和 C/N,而且封育的影响与土层深度有关(图 1,表 1)。在 0—40 cm 土层,封育显著提高了土壤有机碳和全氮含量,其中封育 17、22a 和 27a 后 0—40 cm 土层土壤有机碳平均含量分别增加了 29.8%、34.8%和 29.3%,全氮含量分别增加了 19.5%、32.4%和 29.8%;但是不同封育年限之间差异不显著。对于 40—80 cm 土层来说,不同年限的草地封育对土壤有机碳和全氮影响不显著。这些结果表明,封育对退化草地土壤有机碳和全

氮的影响主要体现在 0—40 cm 土层土壤,而且封育超过 17a 后,封育年限对土壤有机碳和全氮的影响差异不显著。

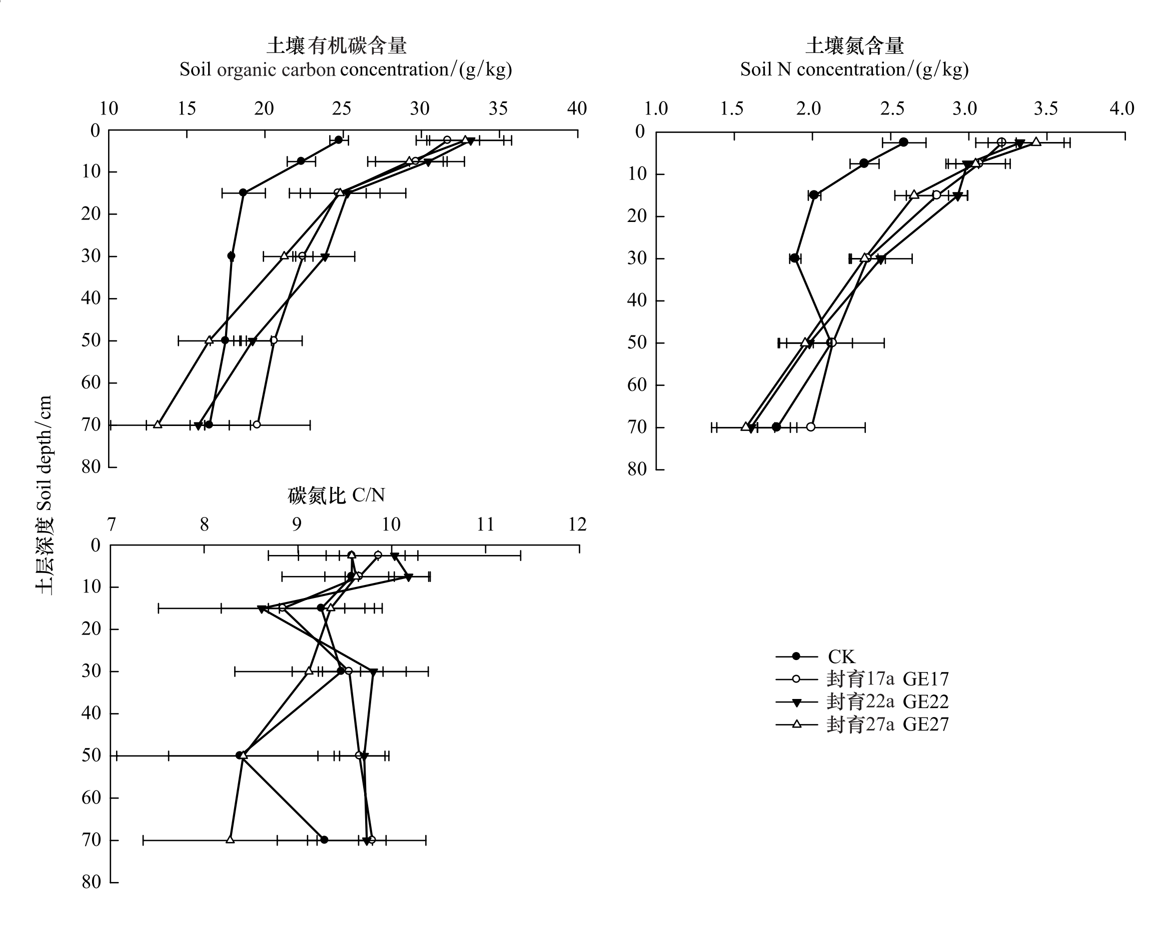


图 1　不同封育年限草地土壤有机碳、氮和碳氮比的剖面分布特征

Fig.1　Distributions of soil OC, N concentration and C/N in soil profile

不同封育年限的土壤有机质和氮在每一土层的差异均达到极显著水平($P<0.01$)

表 1　草地封育对土壤碳氮含量和矿化特征影响的方差分析结果

Table 1　ANOVA results of grazing exclusion on the concentrations of OC and N and mineralization of OC and N

项目 Item	封育 Grazing exclusion		土层 Soil depth		交互作用 Interaction	
	F	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*
SOC	81.3	<0.001	23.2	<0.001	2.9	0.002
TN	102.1	<0.001	26.1	<0.001	4.8	<0.001
C/N	3.0	0.020	3.2	0.030	1.2	0.320
C_{min}	83.9	<0.001	48.0	<0.001	2.1	0.030
C_{min}/C_0	1.0	0.430	5.2	0.003	1.5	0.160
N_{min}	104.7	0.003	5.3	<0.001	2.3	0.020
N_{nit}	353.5	<0.001	5.2	0.003	1.6	0.130
N_{amm}	228.3	<0.001	11.8	<0.001	2.6	0.007
N_{min}/N_0	30.3	<0.001	22.5	<0.001	1.3	0.270

SOC: 土壤有机碳 Soil organic carbon; TN: 全氮 Total nitrogen; C/N: 碳氮比 Carbon-nitrogen ratio; C_{min}: 碳矿化速率 Carbon mineralization rate; N_{min}: 氮矿化速率 Nitrogen mineralization rate; N_{nit}硝化速率 Soil nitrification rate; N_{amm}:铵化速率 Soil ammonification rate.

2.2　土壤有机碳矿化特征

土壤有机碳矿化速率随土层深度增加逐渐降低(图 2),所有处理的平均值从 69.8 μg g^{-1} d^{-1}(0—5 cm)降低到 36.8 μg g^{-1} d^{-1}(60—80 cm);但有机碳矿化量与有机碳含量的比例(C_{min}/C_0)随土层深度的变化趋势则

受草地封育的影响(图 2),表层土壤 C_{min}/C_0比较集中,主要介于 1.40—2.10 之间。与表层土壤相比,未封育草地深层土壤 C_{min}/C_0较低,封育 22a 和 27a 草地深层土壤 C_{min}/C_0则较高。

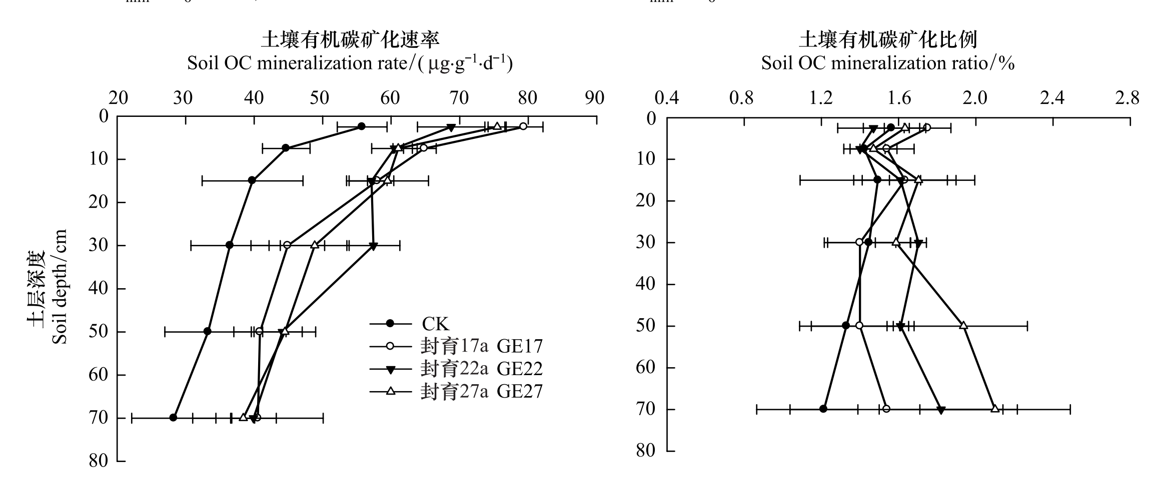


图 2 封育年限对草地土壤有机碳矿化速率和矿化比例的影响

Fig.2 The effect of grazing exclusion on soil OC mineralization rate and ratios

与未封育草地相比,封育后 0—80 cm 土层土壤有机碳矿化速率均显著增加,但是不同封育年限之间差异不显著,如 0—80 cm 土层土壤有机碳矿化速率在封育 17a 后增加了 22.7%—45.8%,封育 22 年后增加了 23.3%—57.4%,封育 27a 后增加了 33.7%—49.5%。封育后土壤 C_{min}/C_0在不同土层均有所增加,但是增加幅度与土层深度和封育年限有关。在 0—40 cm 土层,不同封育年限对 C_{min}/C_0的增加幅度差异不显著,其中封育 17a 后 C_{min}/C_0平均值增加了 6.8%,封育 22a 后增加了 4.5%,封育 27a 后增加了 8.0%。而在 40—80 cm 土层,C_{min}/C_0的增加幅度随封育年限的延长而增加,其中封育 17、22a 和 27a 后 C_{min}/C_0平均值分别增加了 15.8%、35.0%和 58.9%。

2.3 土壤氮素矿化特征

土壤硝化速率和矿化速率随土层深度的增加逐渐降低(图 3),所有处理硝化速率的平均值从 0—5 cm 的 4.9 μg g^{-1} d^{-1}降低到 60—80 cm 的 0.5 μg g^{-1} d^{-1},矿化速率的平均值从 0—5 cm 的 3.2 μg g^{-1} d^{-1}降低到 60—80 cm 的 1.3 μg g^{-1} d^{-1}。铵化速率则随土层深度的增加而增加(图 3),如所有处理铵化速率的平均值从 0—5 cm 的−1.6 μg g^{-1} d^{-1}增加到 60—80 cm 的 0.8 μg g^{-1} d^{-1}。此外,硝化作用和铵化作用的比例因土层而异,对于 0—40 cm 土层来说,氮素矿化表现为硝化过程和铵态氮的固定作用,如硝化速率介于 1.5 μg g^{-1} d^{-1}和 2.5 μg g^{-1} d^{-1}之间,而铵化速率介于−1.6 和 0.1 μg g^{-1} d^{-1}之间,表明硝化过程占主导作用。对于 40—80 cm 土层来说,硝化过程和铵化过程的比例接近,如硝化速率和铵化速率分别介于 1.3—1.8 μg g^{-1} d^{-1}和 0.7—0.8 μg g^{-1} d^{-1}之间,表明深层土壤氮素矿化由硝化过程和铵化过程共同主导。

由表 1 可以看出,土壤氮矿化受封育、土层深度及二者交互作用的影响。与未封育草地相比,不同封育年限草地 0—40 cm 土层土壤氮硝化速率均有所增加,而 40—80 cm 土层土壤氮硝化速率在不同的封育年限变化不同,其中封育 17a 后氮硝化速率显著增加,封育 22a 和 27a 后则分别降低了 26.5%和 34.3%(图 3)。封育对 0—20 cm 土层土壤铵化速率的影响差异不显著($P>0.05$),但 20—80 cm 土层土壤铵化速率则在封育 27a 后显著增加,封育 17a 和 22a 后显著降低(图 3),表明封育 27a 促进了深层土壤氨化过程,而封育 17a 和 22a 则促进了土壤微生物对铵态氮的利用和固定。封育显著提高了 0—40 cm 土层土壤氮素矿化速率,但却降低了 40—80 cm 土层土壤矿化速率。其中封育 17、22a 和 27a 后 0—40 cm 土层氮素平均矿化速率分别增加了 5.6%、4.0%和 14.3%,而 40—80 cm 土层平均矿化速率则分别降低了 12.3%、38.4%和 12.0%(图 3)。草地封育显著降低了土壤氮素矿化量与全氮含量的比例(N_{min}/N_0),降低幅度以封育 27a 最小(平均为 8.9%),封育 17a 和 22a 较大(分别为 17.0%和 24.6%)。

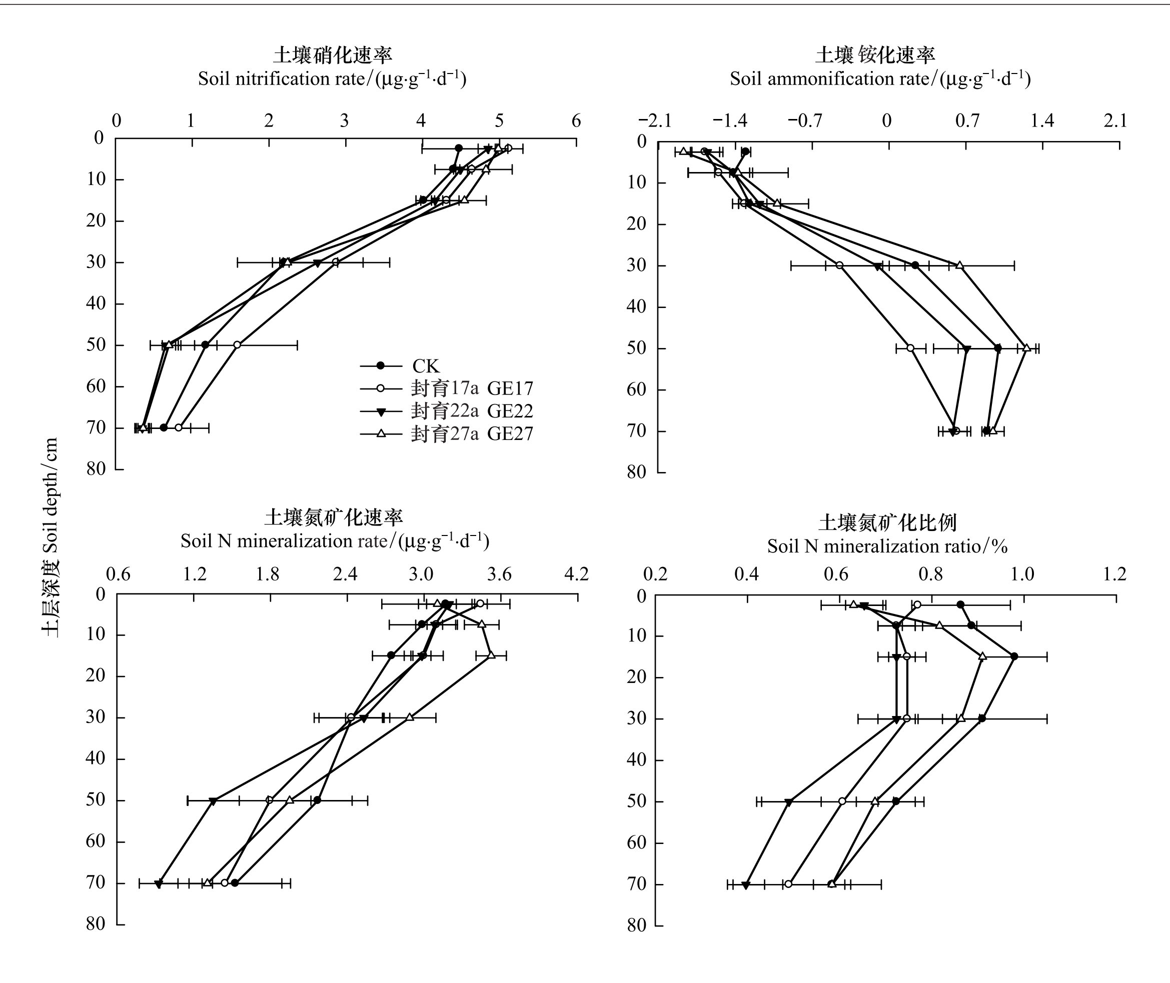


图 3　封育年限对草地土壤氮矿化的影响

Fig.3　The effect of grazing exclusion on soil N mineralization

3　讨论

3.1　封育对土壤碳氮的影响

草地封育可以显著提高土壤有机碳和全氮含量[19-22],如 Li 等[20]在内蒙古砂质草地上的研究结果表明封育草地土壤有机质、全氮、有效氮和全钾含量均显著高于相邻的连续放牧草地;Mekuria[21]在埃塞尔比亚提格里州的研究结果表明与未封育草地相比,封育 5a 和 10a 后,土壤有机质、全氮和磷含量均有显著提高。在本研究中,半干旱黄土区草地封育也显著增加了土壤碳氮含量。也有研究显示,封育对土壤肥力无影响,甚至不利于土壤肥力的恢复。例如,Najmeh Ghorbani 等[23]在伊朗西南部干旱和半干旱草地放牧与围封的研究结果显示,放牧与围封(20—25a)草地土壤有机碳含量无差异。Wang 等[24]在甘肃省的榆中县的研究结果表明,经过 8a 的封育措施,土壤氮含量与未封育草原相比无变化。这说明了封育对草原的作用不能一概而论,其最终的正负效应与退化草原所处的环境条件、利用历史等密切相关。

本研究中退化草地封育 17a 后土壤有机碳和氮含量不再显著增加,可能是随着封育时间的延长,草地生态系统碳氮循环逐渐趋于平衡状态,土壤有机碳和全氮的输入量与输出量接近,碳氮含量不再受到显著影响。如 Qiu 等[17]的研究结果表明,云雾山草地封育 17a 后,地上部生物量和生态系统碳氮储量不再随封育年限延长而增加;其他学者在我国北方草地的研究结果也表明,草地封育 20a 后生态系统生产力趋于稳定,土壤呼吸和碳氮储量不再随封育年限变化[25-27];Werth 等[28]在德国西南部的封育草地也得到相似的研究结果。另一方面,随着封育时间的延长,生态系统物种丰富度增加[20,29],积累在地表的凋落物量增加,降低了凋落物与土壤接触的紧密程度,凋落物的分解过程减缓,其对土壤碳氮的输入量不再随年限的增加而增加,从而限制了土

壤碳氮的继续增加[17]。因此,草原围封时间尺度的把握应根据草原退化程度和草原围封后的回复状况而定,退化草原围封一定时期后,可进行适度利用。

本研究中封育对土壤碳氮含量的影响在0—40 cm土层土壤中差异显著,这与温仲明等[26]的研究结果一致。这是因为封育后土壤碳氮主要来源于地上部植被凋落物和地下部植物根系[30]。对于多数草地生态系统来说,植物根系主要集中在0—40 cm的表层土壤中,且随土壤深度的增加而减少[31]。另外,本研究中云雾山保护区年降水量为425 mm,凋落物分解释放的碳氮以及浅层(0—40 cm)土壤碳氮随降水向深层土壤淋溶的较少。因此本研究中草地封育后土壤碳氮含量的增加主要体现在0—40 cm土层土壤。

3.2 封育对土壤碳氮矿化的影响

研究结果表明,草地封育后土壤有机碳氮矿化量和矿化速率也有不同程度提高。王若梦等[32]的研究结果表明在培养42d内,长期围封的大针茅草地的土壤碳矿化累积量高于自由放牧草地;徐丽等[33]的研究结果表明与自由放牧相比,从东到西青藏高原8个封育高寒草地的土壤碳矿化量均高于自由放牧草地,且土壤碳矿化速率与土壤有机碳和全氮含量显著正相关。这与本研究的结果一致。但也有研究结果显示,随着放牧压力的增强,土壤氮矿化速率升高[10,34-35]。这可能与氮矿化的测定方法有关,本实验采用室内培养的方法,与原位培养相比,人为调节的温度及土壤含水量均为微生物提供了适宜的环境,因此封育草原土壤较高的氮含量对应于较高的氮矿化速率。本研究中,不同处理土壤有机碳含量与有机碳矿化速率呈现出相似的变化趋势和剖面分布特征(图1,图2),而且二者极显著正相关(表2);不同处理硝化速率和氮素矿化速率与土壤全氮含量呈现出相似的变化趋势和剖面分布特征(图1,图3),并且与土壤全氮含量极显著正相关(表2),表明研究区草地封育后土壤碳氮矿化速率的提高主要受土壤碳氮含量影响。但是土壤铵化速率则与有机碳和全氮含量极显著负相关,这可能与有机质矿化过程中微生物和植物对铵态氮的利用强度增加引起的铵态氮的固定有关。

表2 土壤中碳氮矿化速率与土壤有机碳和全氮的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between mineralization rate of OC or N and concentrations of soil OC or N

项目 Item	有机碳 SOC	全氮 TN	C/N
C_{min}	0.845 (P<0.001)	0.861(P<0.001)	0.237 (P<0.001)
N_{min}	0.761 (P<0.001)	0.816 (P<0.001)	0.116 (P>0.05)

C_{min}/C_0表征的是土壤有机碳中可矿化的部分占土壤总有机碳的比例,其值越高,土壤有机碳越易于矿化[36],因此,根据本研究结果,随着封育年限的延长,土壤中可矿化的有机碳比例逐渐增加,其稳定性逐渐降低,也表明封育后土壤中新增加的有机碳主要为活性有机碳。这与Wang等[37]的研究结果一致。封育草地土壤N_{min}/N_0显著低于未封育草地,表明草地封育后积累的氮素比较稳定,不容易矿化损失。但是由于土壤氮素只有矿化为无机氮后才能被植物和微生物利用,本研究中草地封育后N_{min}/N_0的降低也可能表明土壤氮素有效性的降低。这是因为研究区草地没有外源氮素添加,草地封育促进了氮素的生物地球化学循环过程,增加了植物对土壤无机氮的吸收和利用,而被植物吸收的氮素以有机氮的形式归还到土壤中,这些新归还到土壤中的有机氮素矿化潜力较小,从而造成土壤中N_{min}/N_0的降低。

4 结论

(1)黄土高原退化草地封育后0—40 cm土层土壤有机碳和全氮含量均显著增加,其中封育17a后增加最多,表明封育对退化草地土壤有机碳和全氮的影响主要体现在0—40 cm土层,封育17a后,封育年限的影响逐渐减弱。

(2)土壤有机碳矿化速率随土层深度增加逐渐降低,但C_{min}/C_0随土层深度的变化趋势则与草地封育有关,与表层土壤相比,未封育草地深层土壤C_{min}/C_0较低,封育22a和27a草地深层土壤C_{min}/C_0则较高。封育

显著增加了土壤有机碳矿化速率和 C_{min}/C_0,封育对有机碳矿化速率的影响与封育年限和土层深度无关,而对 C_{min}/C_0 的影响则与封育年限和土层深度有关。

(3)土壤硝化速率和矿化速率随土层深度的增加逐渐降低,铵化速率随土层深度的增加而增加。0—40 cm 土层硝化过程占主导作用,40—80 cm 土层土壤氮素矿化由硝化过程和铵化过程共同主导。封育显著提高了 0—40 cm 土层土壤氮素矿化速率,但是降低了 40—80 cm 土层土壤矿化速率,并且降低了 0—80 cm 土层 N_{min}/N_0。

参考文献(References):

[1] 中华人民共和国环境保护部. 2013 中国环境状况公报. (2014-06-05) [2015-06-08]. http://jcs.mep.gov.cn/hjzl/zkgb/2013zkgb/.

[2] 程积民. 黄土高原草原生态系统研究-云雾山国家级自然保护区. 北京: 科学出版社, 2014.

[3] 程杰, 高亚军. 云雾山封育草地土壤养分变化特征. 草地学报, 2007, 15(3): 273-277.

[4] 许晴, 许中旗, 王英舜. 禁牧对典型草原生态系统服务功能影响的价值评价. 草业科学, 2012, 29(3): 364-369.

[5] 左万庆, 王玉辉, 王风玉, 师广旭. 围栏封育措施对退化羊草草原植物群落特征影响研究. 草业学报, 2009, 18(3): 12-19.

[6] 孙宗玖, 安沙舟, 马金昌. 围栏封育对草原植被及多样性的影响. 干旱区研究, 2007, 24(5): 669-674.

[7] 苏楞高娃, 敖特根, 齐晓荣. 封育对沙化典型草原土壤种子库的影响. 内蒙古草业, 2007, 19(1): 46-48.

[8] 王常慧, 邢雪荣, 韩兴国. 草地生态系统中土壤氮素矿化影响因素的研究进展. 应用生态学报, 2004, 15(11): 2184-2188.

[9] 李忠佩, 张桃林, 陈碧云. 可溶性有机碳的含量动态及其与土壤有机碳矿化的关系. 土壤学报, 2004, 41(4): 544-552.

[10] 陈懂懂, 孙大帅, 张世虎, 杜国祯, 史小明, 王向涛. 青藏高原东缘高寒草甸土壤氮矿化初探. 草地学报, 2011, 19(3): 420-424.

[11] 何念鹏, 韩兴国, 于贵瑞. 长期封育对不同类型草地碳贮量及其固持速率的影响. 生态学报, 2011, 31(15): 4270-4276.

[12] 李顺姬, 邱莉萍, 张兴昌. 黄土高原土壤有机碳矿化及其与土壤理化性质的关系. 生态学报, 2010, 30(5): 1217-1226.

[13] 邱莉萍, 张兴昌, 程积民. 不同封育年限草地土壤有机质组分及其碳库管理指数. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(5): 1166-1171.

[14] 李金芬, 程积民, 刘伟, 古晓林. 黄土高原云雾山草地土壤有机碳、全氮分布特征. 草地学报, 2010, 18(5): 661-668.

[15] 华娟, 赵世伟, 张扬, 马帅. 云雾山草原区不同植被恢复阶段土壤团聚体活性有机碳分布特征. 生态学报, 2009, 29(9): 4613-4619.

[16] 程积民, 万惠娥, 胡相明, 赵艳云. 半干旱区封禁草地凋落物的积累与分解. 生态学报, 2006, 26(4): 1207-1212.

[17] Qiu L P, Wei X R, Zhang X C, Cheng J M. Ecosystem carbon and nitrogen accumulation after grazing exclusion in semiarid grassland. PLos One, 2013, 8(1): e55433.

[18] Qiu L P, Wei X R, Zhang X C, Cheng J M, Gale W, Guo C, Long T. Soil organic carbon losses due to land use change in a semiarid grassland. Plant and Soil, 2012, 355: 299-309.

[19] Mekuria W, Veldkamp E, Haile M, Nyssen J, Muys B, Gebrehiwot K. Effectiveness of exclosures to restore degraded soils as a result of overgrazing in Tigray, Ethiopia. Journal of Arid Environments, 2007, 69(2): 270-284.

[20] Li Y Q, Zhao H L, Zhao X Y, Zhang T H, Li Y L, Cui J Y. Effects of grazing and livestock exclusion on soil physical and chemical properties in desertified sandy grassland, Inner Mongolia, northern China. Environmental Earth Sciences, 2010, 63(4): 771-783.

[21] Mekuria W, Veldkamp E, Haile M, Nyssen J, Muys B, Gebrehiwot K. Effectiveness of exclosures to restore degraded soils as a result of overgrazing in Tigray, Ethiopia. Journal of Arid Environments, 2007, 69(2):270-284.

[22] Steffens M, Kölbl A, Totsche K U, Kögel-Knabner I. Grazing effects on soil chemical and physical properties in a semiarid steppe of Inner Mongolia (P. R. China). Geoderma, 2008, 143: 63-72.

[23] Ghorbani N, Raiesi F, Ghorbani S. Bulk soil and particle size-associated C and N under grazed and ungrazed regimes in Mountainous arid and semi-arid rangelands. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2012, 93(1): 15-34.

[24] Wang D, Wu G L, Zhu Y J,Shi Z H. Grazing exclusion effects on above-and below-ground C and N pools of typical grassland on the Loess Plateau (China). Catena, 2014, 123: 113-120.

[25] Bai Y F, Han X G, Wu J G, Chen Z Z, Li L H. Ecosystem stability and compensatory effects in the Inner Mongolia grassland. Nature, 2004, 431 (7005): 181-184.

[26] 贾宏涛, 蒋平安, 赵成义, 胡玉昆, 李赟. 围封年限对草地生态系统碳分配的影响. 干旱地区农业研究, 2009, 27(1): 33-36.

[27] He N P, Yu Q, Wu L, Wang Y S, Han X G. Carbon and nitrogen store and storage potential as affected by land-use in a Leymus chinensis grassland of northern China. Soil Biology & Biochemistry, 2008, 40(12): 2952-2959.

[28] Werth M, Brauckmann H J, Broll G, Schreiber K F. Analysis and simulation of soil organic carbon stocks in grassland ecosystems in SW Germany. Jouranl of Plant Nutrition and Soil Science, 2005, 168(4): 472-482.

[29] 贾晓妮, 程积民, 万惠娥. 封育对云雾山本氏针茅草地群落的影响. 草地学报, 2008, 16(3): 272-277.

[30] 温仲明, 焦峰, 赫晓慧, 焦菊英. 黄土高原森林边缘区退耕地植被自然恢复及其对土壤养分变化的影响. 草业学报, 2007, 16(1): 16-23.

[31] 周梦华, 程积民, 万惠娥, 王丽学, 赵凌平. 云雾山本氏针茅群落根系分布特征. 草地学报, 2008, 16(3): 267-271.

[32] 王若梦, 董宽虎, 何念鹏, 朱剑兴, 代景忠, 施侃侃. 围封对内蒙古大针茅草地土壤碳矿化及其激发效应的影响. 生态学报, 2013, 33(12): 3622-3629.

[33] 徐丽, 于书霞, 何念鹏, 温学发, 石培礼, 张扬建, 代景忠, 王若梦. 青藏高原高寒草地土壤碳矿化及其温度敏感性. 植物生态学报, 2013, 37(11): 988-997.

[34] Gao Y H, Luo P, Wu N, Chen H, Wang G X. Impacts of grazing intensity on nitrogen pools and nitrogen cycle in an alpine meadow on the eastern Tibetan plateau. Applied Ecology & Environmental Reasearch, 2008, 6(3): 69-79.

[35] Wu H H, Dannenmann M, Fanselow N, Wolf B, Yao Z S, Wu X, Brüggemann N, Zheng X H, Han X G, Dittert K, Butterbach-Bahl K. Feedback of grazing on gross rates of N mineralization and inorganic N partitioning in steppe soils of Inner Mongolia. Plant and Soil, 2011, 340: 27-39.

[36] 罗友进, 赵光, 高明, 魏朝富, 赵丽荣. 不同植被覆盖对土壤有机碳矿化及团聚体碳分布的影响. 水土保持学报, 2010, 24(6): 117-122.

[37] Wang C Y, He N P, Zhang J J, Lv Y L, Wang L. Long-Term grazing exclusion improves the composition and stability of soil organic matter in Inner Mongolian grasslands. PLoS One, 2015, 10(6): e0128837.